

DESARROLLO Y EXPERIMENTACIÓN DEL SISTEMA M.L.G. (METRO LIGERO DE GRANADA): PRIMER SISTEMA NACIONAL DE VÍA EN PLACA EMBEBIDA EN HORMIGÓN REALIZADO CON UNA MEZCLA DE CAUCHO PROCEDENTE DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU) Y RESINA DE MATRIZ POLIMÉRICA

Jose Daniel García Espinel.

Director del Departamento de Implantación e Innovación.
Centro tecnológico de I+D+i, ACCIONA Infraestructuras.
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
jgarcia4@acciona.es. Teléfono: 91 791 20 20

Resumen: En la obra “U.T.E Campus de la Salud-Armilla (Granada)” la Dirección de I+D+i de ACCIONA Infraestructuras ha desarrollado y aplicado con éxito, en un tramo de prueba de 800 metros lineales de vía simple, el primer sistema nacional de vía en placa embebida en hormigón utilizando una mezcla de caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU) y resina de matriz polimérica. Este sistema permite reducir el fuerte impacto medioambiental provocado por los vertederos de neumáticos usados, destacando su alto nivel de atenuación de vibraciones, parámetro clave en un sistema de vía urbano, debido a la presencia de edificaciones cercanas.

Palabras clave: Caucho, neumático, vía, placa, ambiental, vibraciones, Acciona, I+D.

Abstract: During the construction of the project “U.T.E Campus de la Salud Armilla (Granada)” the R&D Direction of ACCIONA Infraestructuras has developed and applied successfully in a test pilot of eight hundred meters of simple track a new slab track railway system using rubber from scrap tires and resins with polymeric matrix, which it allows to reduce the high environmental impact caused by the landfills of used tires, distinguishing a high level of airborne noise, a key parameter in an urban railway system, due to presence of closed buildings.

Keywords: Rubber, tires, track, slab, environmental, airborne noise, Acciona, R&D.

1. Introducción

El sistema de transporte público ferroviario, traccionado con energía eléctrica, se presenta como la mejor alternativa con elevados ratios de eficiencia energética y sostenibilidad, ya que combina grandes niveles de calidad en cuanto a accesibilidad, capacidad, regularidad, seguridad y velocidad. Por ello numerosas ciudades pretenden potenciar un transporte ferroviario urbano sostenible.

2. Breve reseña histórica sobre los tranvías en Granada

En 1884 se construye el primer tranvía de Granada en Motril, siendo pionera en la construcción de este tipo de transporte. En 1903 Nicolás de Escoriaza crea la compañía Tranvías Eléctricos de Granada S.A. (TEGSA), convirtiéndose en poco más de una década en una de las compañías de tranvías más importantes de España con 80 kilómetros de vías suburbanas. Las líneas de tranvía en Granada tuvieron un gran auge hasta que a finales de los años 50. A comienzos de los 60 comienza su declive, cerrándose las líneas urbanas en 1963. Unos años después dejan de circular los tranvías por la Vega de Granada, desapareciendo definitivamente en 1974.

En el año 2000, y en el marco del Plan Director de Infraestructuras de Andalucía 1997-2007 aprobado por el Decreto 108/1999 de 11 de Mayo, la Consejería de Obras Públicas y Transporte de la Junta de Andalucía pone en marcha los estudios para la creación de “La Línea 1 Metropolitana del Metro Ligerero de Granada”, de 16 km. de longitud, que unirá las localidades de Albolote, Maracena y Armilla con la ciudad de Granada.

El impulso de la Junta de Andalucía para la Investigación, el Desarrollo y la Innovación (I+D+i), ha hecho posible la realización del tramo de prueba del sistema MLG desarrollado por la dirección de I+D+i de ACCIONA Infraestructuras, convirtiéndose en una de las administraciones que impulsan la innovación tecnológica ferroviaria, marcando un hilo en el desarrollo de la tecnología de la vía en placa de nuestro país.



Figura 1. Trazado Tramo III, Polígono Tecnológico de las Ciencias de la Salud – Armilla, del Metroropolitano de Granada.

3. Estudios preliminares.

3.1. Introducción.

El fruto del trabajo durante dos años por parte de la dirección de I+D+i de ACCIONA en proyectos de investigación para la reutilización de residuos, es este proyecto de elementos amortiguadores de ruido y vibraciones para sistemas de vía en placa que aprovecha las ventajas del caucho procedente de los NFUs, uno de los residuos con mayor problemática, utilizando una matriz polimérica como conglomerante.

Como resultado de las expectativas puestas en este desarrollo se realizó una propuesta de I+D+i a la Corporación Tecnológica de Andalucía (CTA) presentando un proyecto con el título de **VIANDA**: “Diseño de sistema de VÍA en placa mediante la utilización de una mezcla de neumáticos fuera de uso y resina para su aplicación en líneas de ferrocarril de ANDALUCIA”, y que fue aprobada por dicho organismo.

El objeto básico del sistema es el de introducir este elemento amortiguador entre el carril y la losa de hormigón por medio de la realización previa de un encamisado del mismo que, además de envolver al carril, le aporte propiedades elásticas que amortigüen las vibraciones producidas por el paso de los trenes y, de esta manera, eviten afecciones a las edificaciones cercanas.

Este sistema ha sido desarrollado en el Centro Tecnológico de I+D+i de Madrid de ACCIONA y está patentado y protegido su propiedad intelectual por ACCIONA Infraestructuras.

3.2. Caracterización del material.

Mediante estudios previos, se determinó la densidad específica, densidad aparente, porcentaje de vacíos, granulometrías y forma de NFU, así como las características físicas y químicas de la matriz (Figuras 2 y 3). Posteriormente se realizaron mezclas con dosificaciones variables a temperatura ambiente y tiempos de adquisición de propiedades próximos a las 24 horas, sin necesidad de incorporar aditivos que variaran la temperatura y aceleraran el curado. También se analizó en profundidad el comportamiento físico y mecánico de las mezclas.

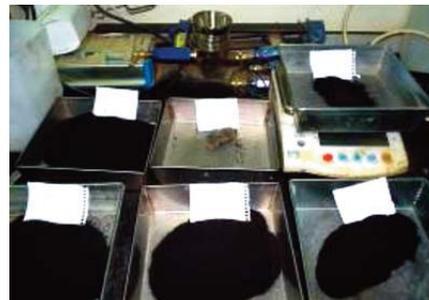
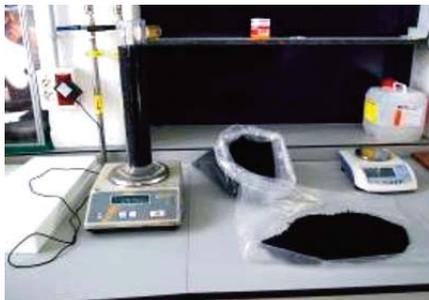


Figura 2 y 3. Caracterización del neumático fuera de uso (NFU).

Sobre los estudios en laboratorio, se realizaron una serie de ensayos a compresión, utilizando probetas cilíndricas, con una gran variedad de dosificaciones diferentes, tanto en granulometrías, tipos de matrices y relación NFU - Matriz. Los ensayos de elasticidad proporcionaron información de las deformaciones sufridas por las probetas en función de la fuerza aplicada, para luego calcular y obtener el Módulo de Deformación a la compresión (E_c) y su coeficiente de Poisson (ν) (Figuras 4 y 5) de las mismas, tanto a 1, 14 y 28 días de curado, en 3 ciclos de carga y descarga por probeta ensayada.



Figuras 4 y 5. Ejemplo de probetas y ensayo a compresión simple.

Para determinar el Modulo de Deformación (E_c), se obtiene del cálculo basado en la formulación matemática de la Ley de Hooke, ecuación de la teoría de la elasticidad, mostrada a continuación:

$$\sigma = \frac{F}{S} = \varepsilon \cdot E \Rightarrow \frac{F}{S} = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot E \Rightarrow E = \frac{F \cdot L_0}{S \cdot \Delta L}$$

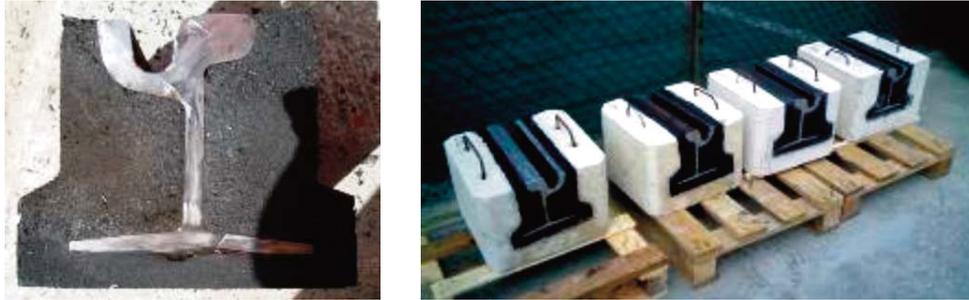
donde σ : Tensión; ε : Deformación específica; E: Modulo de deformación a compresión. F: Fuerza aplicada; S: Superficie sobre la que se aplica la carga; ΔL .Deflexión.; L_0 Altura inicial de la probeta; L_f Altura final de la probeta.

En base a los resultados obtenidos a través de las probetas y tras la elaboración de un modelo de elementos finitos se fabricaron diferentes prototipos del Sistema M.L.G, en función del módulo de rigidez óptimo que se pretendía obtener para el sistema.

3.3 Elaboración de prototipos.

Una vez caracterizadas las mezclas, y su comportamiento a la deformación se pasó a fabricar los prototipos para la realización de los ensayos de comportamiento del sistema y la validación del mismo desde el punto de vista mecánico, de **35 cm. de largo** y con la sección que se observa en la Figura 6.

Una vez realizados los prototipos se ensayaron en una prensa de compresión simple para hallar su constante de rigidez estática (K) y posteriormente se hormigonaron hasta conseguir un dado con el fin de simular la losa de hormigón en la que el carril irá embebido y hallar su constante de rigidez estática final. De esta forma se calculó un factor de correlación entre las deflexiones sufridas por el carril encamisado antes de hormigonar y una vez hormigonado (Figura 7) y la relación entre las constantes de rigidez.



Figuras 6 Y 7 : Vista de la sección del sistema M.L.G; Vista general de los prototipos una vez hormigonado.

4. Ensayos de validación del sistema

Para confirmar los valores obtenidos en los ensayos realizados en el Centro Tecnológico de I+D+i de Acciona, se enviaron prototipos al Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de Materiales (LADICIM) de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Santander de Cantabria, para que sobre éstos se realizaran todos los ensayos necesarios para poder validar el sistema y poder comprobar su comportamiento frente a cargas estáticas, dinámicas y su comportamiento a fatiga.

Todos los ensayos que a continuación se van a describir se realizaron siguiendo el procedimiento indicado en la **Normativa de Metro de Madrid MM-EV-1-2-01: “Fabricación y homologación de vía en placa con tacos prefabricados embebidos en elastómero”**. Reseñar que, aunque esta normativa no deje ser una recopilación de normas UNE (en especial la **Norma UNE-EN 13481-5: Sistemas de sujeción para vía en placa**), Metro de Madrid es la única administración pública en España con una normativa propia y de obligado cumplimiento para la homologación de todos los elementos de vía que se ejecutan en sus instalaciones.

4.1. Ensayos mecánicos.

Cálculo de la carga equivalente del sistema. En el caso del sistema del Metro ligero de Granada la carga equivalente del sistema es de 24 kN.

Ensayo de carga vertical estática. Pretende determinar la rigidez estática secante del sistema que en el sistema MLG se determina en $K = 35 \text{ kN/mm/ml}$ (Figura 8).



Figuras 8 ,9 y 10: Vista general de la disposición del prototipo en el ensayo de carga vertical estática.; Vista general del prototipo en el ensayo de carga estática angular (22°); Disposición del ensayo de aislamiento eléctrico.

Ensayo de carga angular dinámica (22°)(Figura 8).

Ensayo de carga vertical dinámica Mide el aumento de rigidez con el aumento de la frecuencia

Ensayo de carga angular estática (22°).(Figura 9).

Ensayos de fatiga.

Ensayo para la determinación del aislamiento eléctrico del conjunto. (Figura 10). Finalmente se obtiene que la resistencia eléctrica del sistema es de 6,22 k Ω , por lo tanto se puede concluir que la resistencia eléctrica alcanzada por el sistema M.L.G. es superior a la requerida por la Normativa, que es de 5 k Ω .

4.2. Resumen de resultados de los ensayos

Una vez obtenidos los resultados de los ensayos realizados por la normativa en aplicación se comprobó que el sistema M.L.G cumplía todos los requisitos mínimos marcados por dicha normativa, por lo que se pudo validar el sistema de forma satisfactoria.

5. Estudio de amortiguación de vibraciones

Todos estos estudios se han realizado tomando como referencia la Norma Europea UNE-EN ISO 10846-1:1997: "Medida en Laboratorio de las propiedades de transferencia vibroacústico de elementos elásticos". Tras la revisión de la bibliografía existente se determinó plantear el problema desde dos puntos de vista diferentes:

En primer lugar se realiza el estudio de las propiedades intrínsecas del sistema: Se interpreta el mismo como un sistema sencillo de un grado de libertad, sistema masa – resorte –

amortiguador. Se caracteriza la atenuación de la transmisión de vibraciones de este sistema mediante el factor de transmisión ó factor de pérdidas por inserción (transmisibilidad), la relación entre la fuerza que excita el sistema y la fuerza transmitida por el sistema. Para determinar la curva de transmisibilidad del sistema M.L.G se obtienen la rigidez dinámica y el factor de amortiguamiento estructural de elemento amortiguador, a partir de la respuesta en frecuencia del sistema.

$$kd = \frac{\text{Re}(R)}{|R|^2 \left(1 - \left(\frac{f_{excitación}}{f_0}\right)^2\right)} \quad \eta = -\frac{\text{Im}(R)}{\text{Re}(R)} \left(1 - \left(\frac{f_{excitación}}{f_0}\right)^2\right)$$

Figura 11. Fórmula para obtener la rigidez dinámica y el factor de amortiguamiento del sistema.

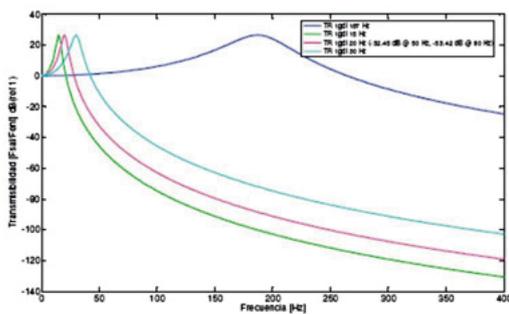


Figura 12. Curva de transmisibilidad del sistema ante condiciones de carga reales.

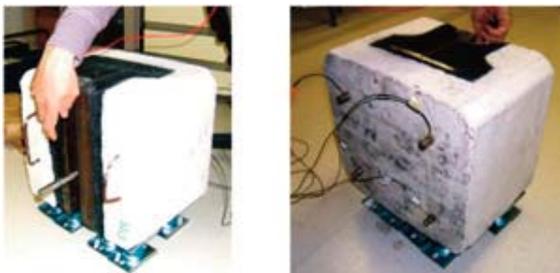


Figura 13. Ensayo con martillo excitador y acelerómetros triaxiales.

El conocimiento de estas características permite interpretar el sistema y evaluar su funcionamiento en las condiciones de carga reales. En la siguiente figura se puede observar cómo varía la curva del sistema M.L.G según diferentes cargas (Figura 12).

En segundo lugar, y a modo de comparativa preliminar entre sistemas con diferentes propiedades, se ha evaluado la diferencia de niveles de velocidad, cuando el sistema es excitado por un impulso, antes y después del elemento elástico. Esta medida ha permitido la discriminación entre los diferentes sistemas desarrollados inicialmente (Figura 13).

De confirmarse los resultados de los ensayos sobre prototipos con los del tramo experimental, el sistema MLG se situaría como una alternativa ventajosa frente a los sistemas usados hoy en día.

Suponiendo un nivel de emisión de vibraciones de 85 dBv en la vía, una atenuación por transmisión a través del terreno de 1dBv/m y un nivel de inmisión admisible de 68dBv en el interiores de las viviendas próximas a la vía, en función de la distancia se necesitarían tres niveles de atenuación de vibraciones (Figura 14), para los cuales con los resultados de los ensayos realizados se puede determinar que el sistema M.L.G supera el máximo nivel de atenuación requerido por dichos niveles.

Distancia	Atenuación requerida	Atenuación Acciona MR
Menor de 7m	19 dBv	> 20 dBv
Entre 7 y 12 m	10 dBv	> 20 dBv
Mayor de 12m	6 dBv	> 20 dBv

Figura 14. Comparativa entre valores de atenuación requeridos y esperados para el sistema M.L.G.

Uno de los problemas planteados en obra durante la ejecución del tramo de prueba fue que uno de los puntos del trazado de prueba discurre a una distancia de 15 m del edificio del Centro de Investigaciones Biomédicas, por lo que la Dirección de Obra solicitó que se estudiara la posibilidad de colocar una manta elastomérica bajo la losa de vía para aumentar la capacidad de atenuación.

Esta adición de la manta implica unas condiciones de contorno diferentes y mayores deflexiones en el carril, por lo que se debió de hacer un reestudio de la curva de atenuación y ubicar la frecuencia de la resonancia para comprobar que no exceda del valor máximo permitido.

Dicho estudio reflejó que en caso de instalar adicionalmente manta elastomérica al sistema MLG, la deflexión sufrida por el conjunto de la vía sería superior al establecido de 3 mm, mientras que la deflexión sufrida únicamente con el sistema MLG sería de 1,81 mm, por lo que complementando estos datos con los resultados del estudio de amortiguación, que aseguraban que en todo momento se cumplían los niveles de atenuación en edificaciones cercanas, finalmente se optó por no instalar la manta elastomérica complementaria.

6. Puesta en obra

La puesta en obra se realiza en dos fases independientes:

6.1. Encamisado de carriles:

El encamisado se realiza impregnando previamente el carril con una resina de imprimación, posteriormente se introduce en un molde que es llenado con la mezcla de NFU y resina, a la cual se le ejerce presión y temperatura para el curado. Aplicar la mezcla directamente sobre el carril garantiza la perfecta adherencia del encamisado evitando cualquier holgura y espacios vacíos.

Las dimensiones del encamisado, y por tanto de los moldes, tienen un estricto control geométrico, usando separadores en la zona de apoyo y centradores para el carril a lo largo del molde. Una vez que la resina ha adquirido las condiciones mínimas de consistencia se extrae el carril ya encamisado para trasladarlo a la zona de acopio (Figura 14).

Para poder realizar la soldadura entre carriles se deja una longitud de 1,00 m. sin encamisar en ambos extremos, que serán encamisados posteriormente in situ siguiendo un procedimiento similar al descrito anteriormente.



Figura 14. Vista general de la zona de acopio de carriles

6.2. Colocación de carriles:

Los carriles que ya han sido encamisados son llevados a la vía, donde después de soldarlos entre sí con soldadura aluminotérmica y realizar el remate del encamisado en dicha zona se colocan en su posición definitiva utilizando una serie de pórticos colocados cada 2,00-2,50 m de los que se suspenden los carriles.

Los carriles se fijan a cada pórtico en dos puntos que aseguran el ancho internacional de vía de 1.435 mm. Los pórticos a su vez cuentan con husillos verticales y horizontales que permiten ajustar la alineación y nivelación de la vía de forma precisa. (Figura 15). Con los carriles colocados en su posición definitiva se procede a hormigonar (Figura 16) la losa de apoyo logrando mantener la correcta posición de los carriles lo cual garantiza la elevada calidad de la vía y el confort posterior del viajero al circular por ella.



Figuras 15,16 y 17. Colocación de los carriles y desvío mediante pórticos; Vía hormigonada y acabado de adoquines.

6.3. Ensayos de Rigidez:

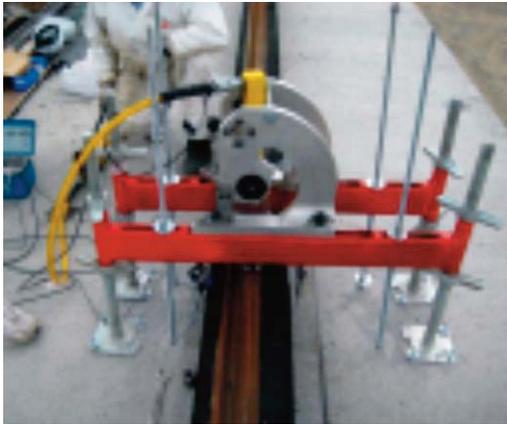


Figura 18. Auscultación de los carriles in situ previa al hormigonado

Para comprobar la correcta ejecución del encamisado de los carriles se realiza un ensayo de rigidez con una prensa móvil autónoma, que consta de un pistón hidráulico con una célula de carga montada en un bastidor anclado al suelo, dos LVDT para medir deformaciones y un registrador de lecturas. Con este conjunto se le aplica al carril una fuerza puntual y se mide la deformación del conjunto del carril encamisado. Haciendo la relación entre fuerza y deformación logramos calcular la rigidez del sistema. Los ensayos se realizan en un banco de pruebas antes de hormigonar (Figura 17) y

posteriormente in situ con el carril ya hormigonado. La máquina utilizada para comprobar la rigidez in situ del elemento amortiguador de la vía en placa ha sido diseñada y patentada por ACCIONA Infraestructuras en el Centro Tecnológico de I+D+i de Madrid.

6.4. Cálculo de deflexiones de vía (Tratado en el punto 5).

7. Ventajas del sistema MLG.

El sistema de vía embebido M.L.G. en placa de hormigón tiene innumerables ventajas, entre las que destacan:

Transformación de un residuo (Neumático Fuera de Uso) en un recurso productivo evitando afecciones al Medio Ambiente: Según el gestor de neumáticos fuera de uso, se revalorizan 7 neumáticos de turismo por metro lineal de vía, lo que supone un total de 5.211 neumáticos en el tramo de prueba del sistema M.L.G

Alta atenuación de vibraciones. En el rango de frecuencias comprendido entre 6,3Hz y 20kHz se consigue una atenuación global mayor de 20Db para este sistema. Este parámetro marca la atenuación de las vibraciones generadas por el tránsito del Metro Ligerero en los edificios colindantes.

Elevado confort del viajero al garantizar la geometría de la vía. Los tres parámetros que marcan la calidad de la vía: nivelación, alineación y ancho de vía, se consiguen con pórticos metálicos extensibles sobre los que se sustenta la vía antes del hormigonado. Éste es el parámetro principal que repercute en el confort del viajero.

Fácil de puesta en obra. Los carriles llegarían a vía como un único bloque monolítico (carril+encamisado), sin posibilidad de despegues, holguras o falta de adherencia por lo que se trabajaría como si fuera un único elemento. Además, el propio encamisado haría de encofrado perdido durante las fases de hormigonado.

Bajo coste de mantenimiento. No tiene fijaciones mecánicas, se consigue una mayor durabilidad del carril y no es necesario realizar realineaciones de vía.

Permite la circulación de vehículos no ferroviarios sobre la vía. En caso de emergencia pueden circular vehículos de auxilio sobre la plataforma y se pueden realizar cruces con tráfico de vehículos no ferroviarios en calles.

Primer desarrollo de un sistema de vía en placa nacional. ACCIONA Infraestructuras ha desarrollado en su Centro Tecnológico de I+D+i de Madrid el primer sistema de vía en placa desarrollado íntegramente en nuestro país.

Experiencia piloto en Andalucía. La ejecución del tramo de prueba de 800 metros de vía simple pone a la vanguardia de la tecnología a Andalucía y en particular al metro ligero de Granada.

8. Conclusiones

Tras la realización de los ensayos previos de validación del sistema y la ejecución del tramo de prueba se puede afirmar que la viabilidad técnica de montaje y ejecución en obra ha sido demostrada con el tramo de prueba realizada en el tramo II, Campus de Salud de la Línea Metropolitana 1, de Metro Ligero de Granada, implicando esta actuación un hito dentro del desarrollo de la tecnología ferroviaria y en concreto de los sistemas de vía en placa dentro de nuestro país.

El desarrollo futuro de esta tecnología con nuevas configuraciones y ampliando el rango de rigidez del sistema, abre la puerta para futuros proyectos de investigación donde se creen nuevas alternativas para sistemas de vía en placa que puedan ser utilizados tanto en el metro subterráneo, como el ferrocarril convencional y la alta velocidad.

9. Agradecimientos

Para concluir queríamos expresar nuestro agradecimiento a todas las entidades, así como su personal involucrado, que han permitido la realización de este tramo de prueba y que han sido imprescindibles para el desarrollo y buen fin de este proyecto:

Ferrocarriles Andaluces de la Junta de Andalucía (Administración Pública).

Oficina Técnica de Estudios y Control de Obras, S.A (Dirección de Obra)

Delegación de Andalucía de ACCIONA Infraestructuras (Constructora).

Hormigones Asfálticos Andaluces, S.A (Constructora)

Signus Ecovalor (Entidad Gestora de neumáticos fuera de uso).

10. Referencias bibliográficas.

De los tranvías a los Metros Ligeros en la Comunidad de Madrid. Madrid: Consejería de transportes e infraestructuras, (MINTRA, Madrid, Infraestructuras del Transporte), Consorcio Regional de Transportes de Madrid, con la colaboración de Metro de Madrid. 2008. 436 p.: il. col. ISBN: 978-84-451-3177-0

Especificación de vía “Fabricación, homologación, suministro y recepción de vía en placa con tacos prefabricados embebidos en elastómero (MM-EV-1-2-01) de Metro de Madrid.

Modern Railway Track. Second Edition (2001).Coenraad Esveld. Delft University.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2003): “UNE-EN 13481-5. Requisitos de funcionamiento para los sistemas de sujeción. Parte 5: Sistemas de sujeción para vía en placa”.

Contribución a la reducción de los costes de mantenimiento de vías de alta velocidad mediante la optimización de su rigidez vertical. Tesis Doctoral P. Fonseca Teixeira. Universidad Politécnica de Cataluña. Depósito Legal: B-34313-2005/84-689-2536-5

Harris C.M. Handbook of noise control. McGraw-Hill, 1957.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR UNE EN ISO 10846-1 (ISO 10846-1:1997). Medida en laboratorio de las propiedades de transferencia vibroacústica de elementos elásticos. Parte 1. Principios y líneas directrices.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR UNE EN ISO 10846-2 (ISO 10846-2:1997). Medida en laboratorio de las propiedades de transferencia vibroacústica de elementos elásticos. Parte 2. Rigidez dinámica de soportes elásticos para movimiento de translación, método directo.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR UNE EN ISO 10846-3 (ISO 10846-3:1997). Medida en laboratorio de las propiedades de transferencia vibroacústica de elementos elásticos. Parte 3. Método indirecto par la determinación de la rigidez dinámica de soportes elásticos en movimientos de translación